

加速器実験からの制限

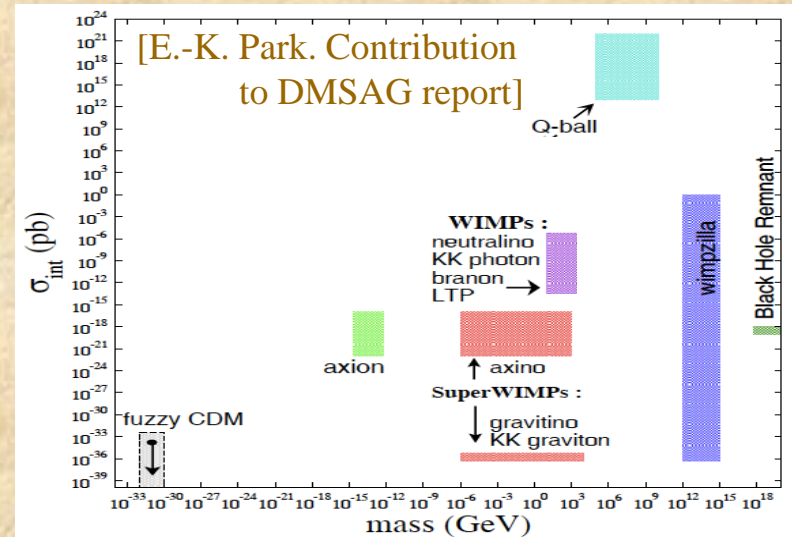
松本 重貴 (カブリ数物連携宇宙研究機構)

1. WIMP暗黒物質とその性質(スピンと量子数)
2. ヒッグス粒子からの暗黒物質生成 (LHC)
3. 電弱相互作用を用いた暗黒物質生成 (LHC)
4. 高次元演算子を用いた暗黒物質生成 (LHC)
5. 将来実験における暗黒物質生成 (ILC / CLIC)

WIMP暗黒物質とその性質

～ 様々な暗黒物質の候補たち ～

- 原始ブラックホール(PBH)
- ステライル ニュートリノ (Split seesaw)
- アクシオン (Strong CP problem)
- **WIMP (SUSY, ヒエラルキー問題, etc.)**
- SuperWIMP (Gravitino, Axino, etc.)
- WIMPZILLA (Super GZK 問題, etc.)



～ WIMP暗黒物質とその特徴 ～

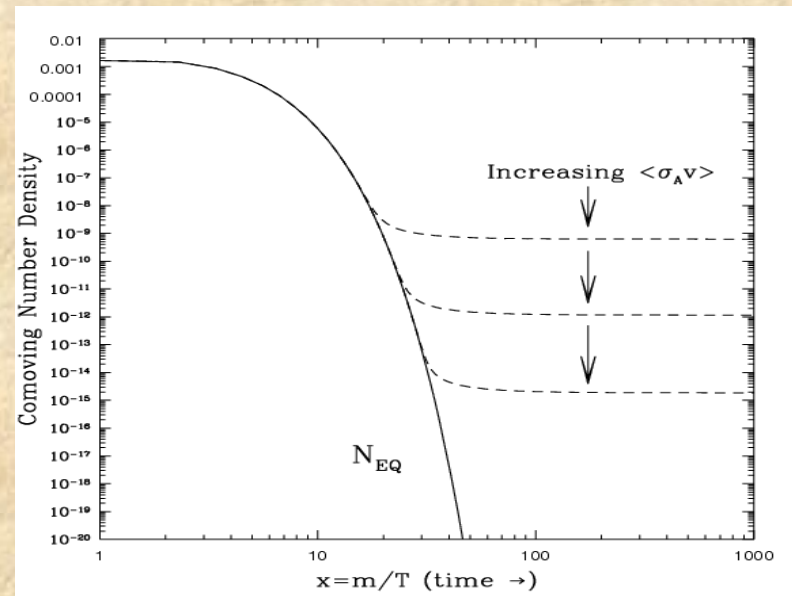
WIMP DM = $O(10 - 1000)$ GeVの質量を持つ安定で中性な(普通の)粒子。



WIMP DMの初期宇宙での振る舞いより

- WIMP DMは冷たい暗黒物質になる。
- WIMP DMの熱的残存量は以下の通り

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.1 \text{ pb} \cdot c / \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle$$

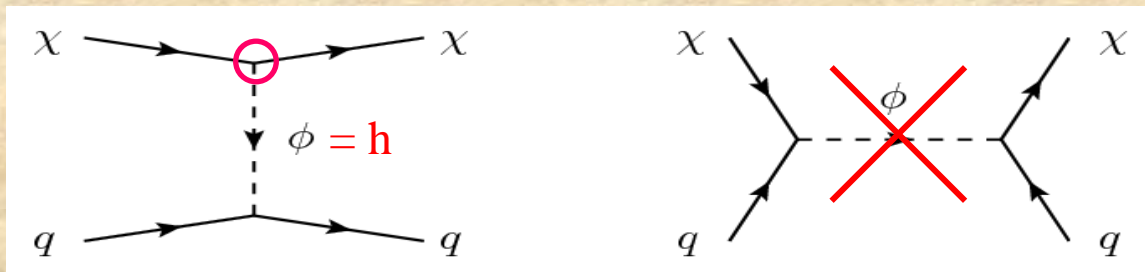
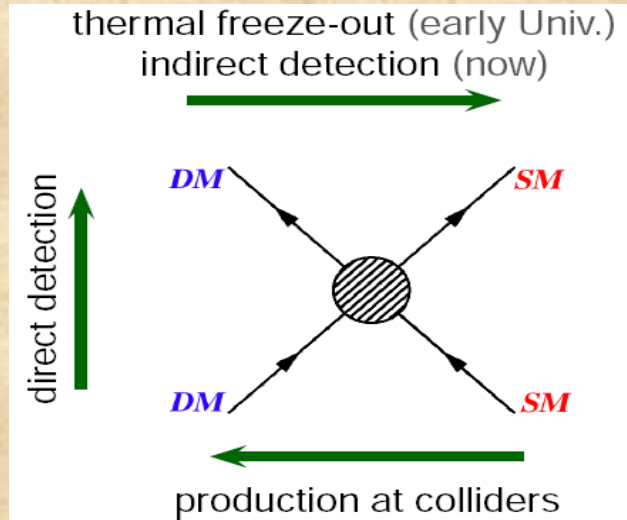


WIMP暗黒物質とその性質

～ 加速器における暗黒物質探索 ～

- (LHC以前) カラーを持った新しい粒子を生成し、そのカスケード崩壊により暗黒物質を生成。
- (LHC以後) 暗黒物質同士の対消滅過程が存在
 - 暗黒物質と通常物質との散乱(直接測定)
 - 通常物質衝突からの生成(加速器シグナル)

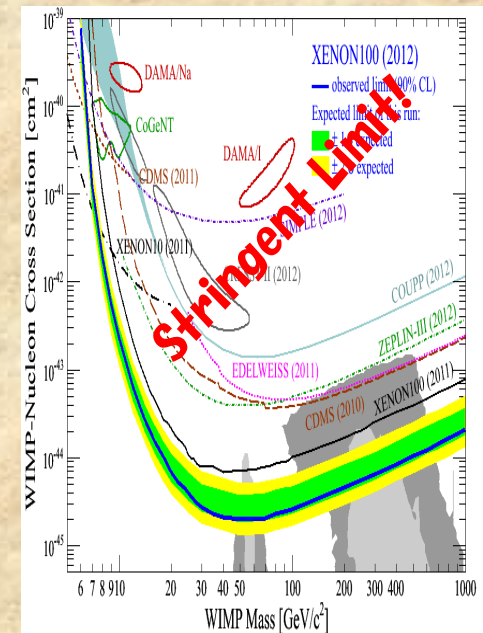
この関係をもう少し丁寧に見る必要が有る！



Higgs-DM-DM coupling が抑制されている？

→ DMが弱い相互作用の純粋状態に近いとき、
SU(2)_Lゲージ不変性よりcouplingが抑制！

(DMがスカラーだとDM²|H|² 相互作用を持つ。)



WIMP暗黒物質とその性質

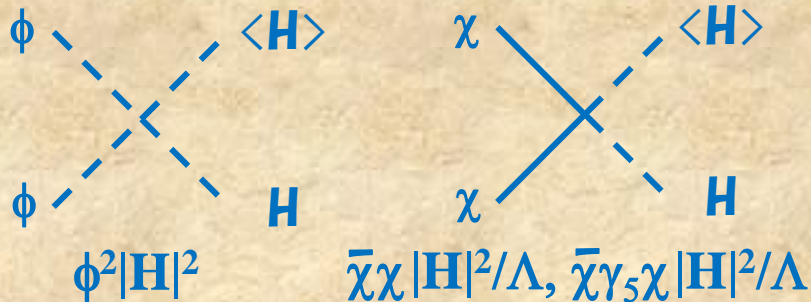
加速器におけるDMシグナルは、それがSM粒子達とどの様に相互作用をするかに依存！

	弱い相互作用をしない	弱い相互作用をする
スカラー暗黒物質	<p>ϕ ϕ H H + H.D.O</p>	<p>ϕ ϕ H H ϕ ϕ V V + H.D.O</p>
フェルミオン暗黒物質	<p>Only H.D.O</p>	<p>χ χ' V V + H.D.O</p>

H.D.O = 暗黒物質場を2つ含む高次元オペレータ (higher dimensional operators)

Higgs粒子からの暗黒物質生成

弱い相互作用をしないIDMにとり重要



[Davoudiasl, Kitano, Li, Murayama, PLB609, 2005]

$m_{DM} < 2m_H$ のとき

ヒッグスからDM対への崩壊分岐比
(Invisible branching frac.)を測定。

$Br(H \rightarrow 2DM) < 65\%$ (Direct)

$Br(H \rightarrow 2DM) < 19\%$ (Indirect)

[ATLAS-CONF-2013-011, Biplob, S.M.,
Mukhopadhyay, Nojiri, arXiv:1306.5857]

Higgsの生成過程はSMと同じと仮定

$m_{DM} > 2m_H$ のとき

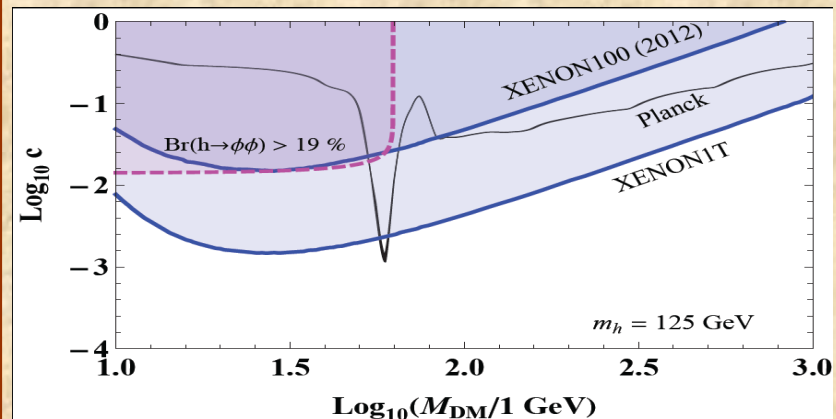
$qq \rightarrow qqVV \rightarrow qqH^* \rightarrow qq\phi\phi$ ($qq\chi\chi$)
(VBFによるDM対生成)

$\sigma_{sig.} \sim c^2 \times 100$ [fb] ($m_\phi \sim m_H/2$)

$\sigma_{sig.} \sim (c/\Lambda_{TeV})^2$ [fb] ($m_\phi \sim m_H/2$)

[Kanemura, S.M. Nabeshima, Okada, PRD82, 2010]

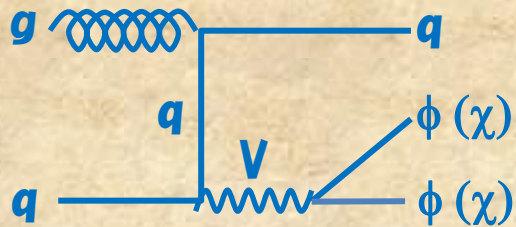
DM発見により良いアイデアが必要!
(直接測定はこの領域も有効に働く)



WIMPミラクル領域はDMが軽いと、
直接測定とLHCで既に排除済み。

電弱相互作用を用いた暗黒物質生成

弱い相互作用をするDMにとり重要



[Feng, Moroi, Randall, Strassler, Su, PRL83, 1999]

[Ibe, Moroi, Yanagida, PLB644, 2007]

DMと縮退したSU(2)パートナーの存在!

シグナルの特徴

DMのSU(2)パートナーの崩壊:

$\chi^+ \rightarrow \chi \pi^+, \chi l^+ \nu, \text{ etc. (via c.c.)}$

(質量差0.1-1GeV \rightarrow Soft π & $l \dots$)

シグナル = Mono-jet + Missing E_T

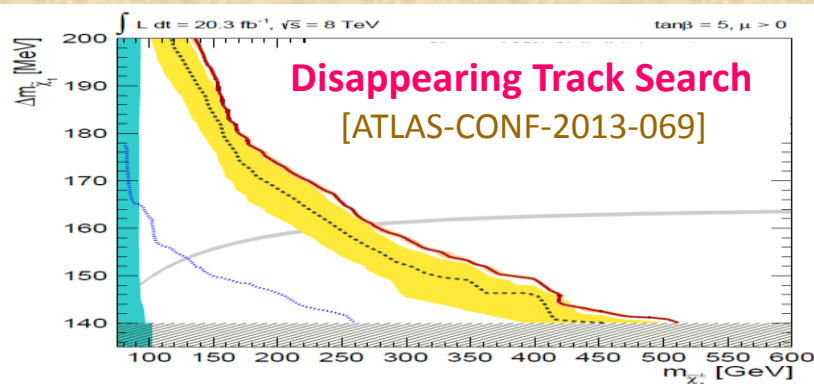
(EW過程+S-channel) \rightarrow シグナル断面積が小さい \rightarrow SM BGIに勝てない。

例1 SU(2)-triplet DM (Wino)

[AMSB, Giudice, Luty, Murayama, Rattazzi, 1998]

$\Delta m \sim 160 \text{ MeV} \rightarrow c \times \tau \sim 7 \text{ cm}$

[Ibe, S.M., Sato, PLB721, 2013 @ 2-loop]



例2 SU(2)-doublet DM (Higgsino)

[Focus Point, Feng, Matchev, Moroi, PRL84, 2000]

- シグナル強度はWino DMの場合に比べて弱い(SU(2)電荷が小さいため)。
- $\Delta m \sim 350 \text{ MeV}$ で”Disappearing track search”が有効ではない。



DMシグナル発見に他のアイデアが必要。
DM間接検出観測が有効(相補的役割)

[Hisano, S.M., Nojiri, PRL92, 2004]

高次元演算子を用いた暗黒物質生成

クォークとDMの相互作用

次元6の演算子

$$\phi^2 \text{QHD} / \Lambda^2$$

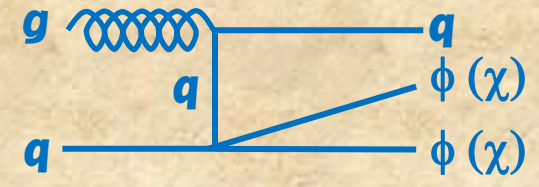
$$\phi^2 \text{QH}^c \text{U} / \Lambda^2$$

$$(\bar{\chi} \gamma^\mu \gamma_5 \chi)(\bar{q} \gamma_\mu q) / \Lambda^2$$

$$(\bar{\chi} \gamma^\mu \chi)(\bar{q} \gamma_\mu q) / \Lambda^2$$

直接測定と相関有り

Mono jet search

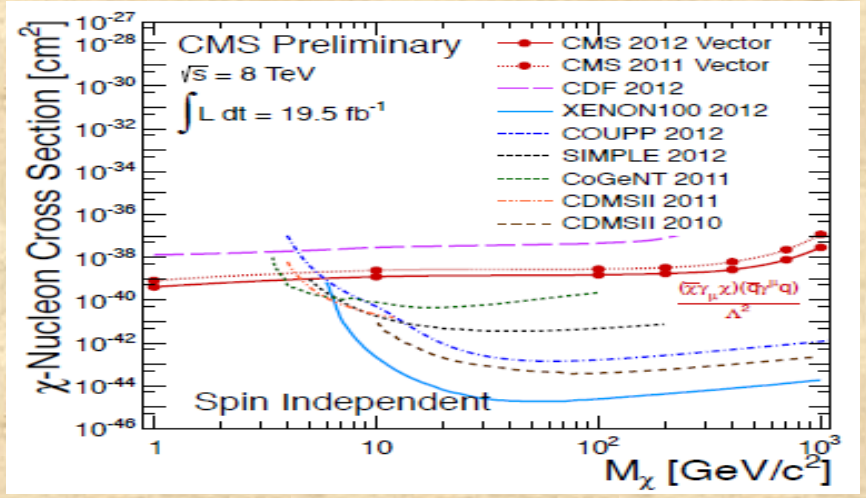


[Beltran, Hooper, Kolb, Krusberg, Tait, JHEP1009]

第3世代クォークの場合 → mono b-jet や $\chi\phi(\chi\chi)$ 過程を考慮する必要有。

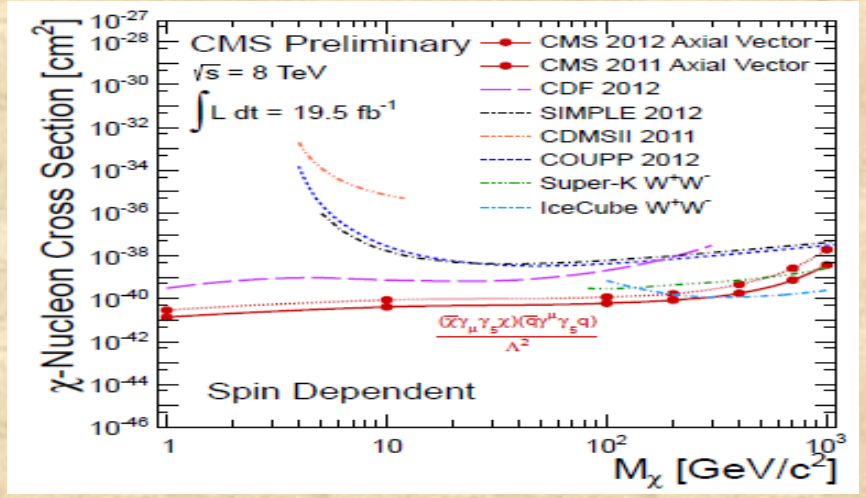
[Biplob, Choudhury, Harigaya, S.M., Nojiri, JHEP1304]

例1 Vector interaction



低質量暗黒物質を強く制限する！

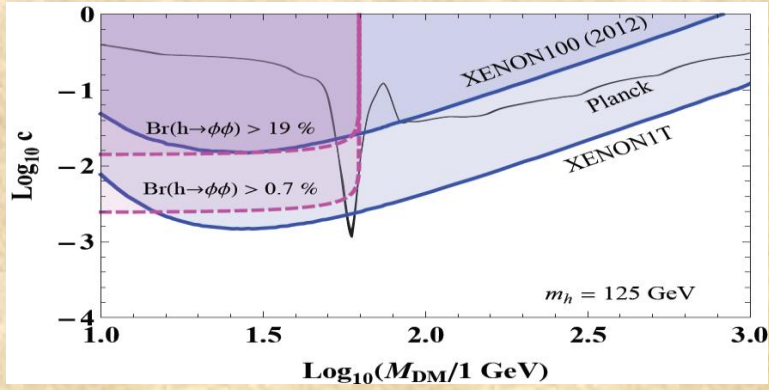
例2 Axial-vector interaction



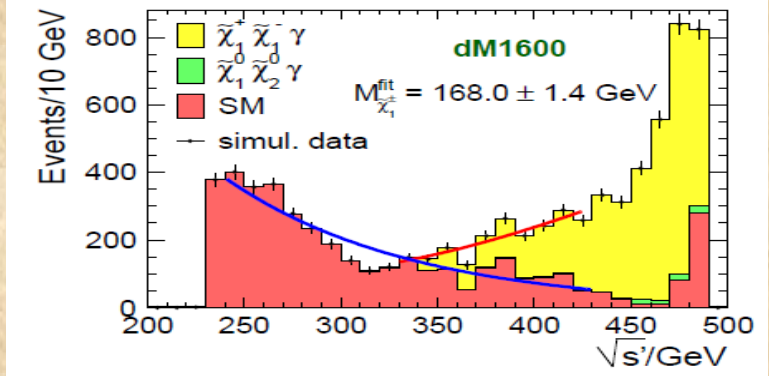
LHCが最も強くスケールを制限する！

将来実験における暗黒物質生成(ILC/CLIC)

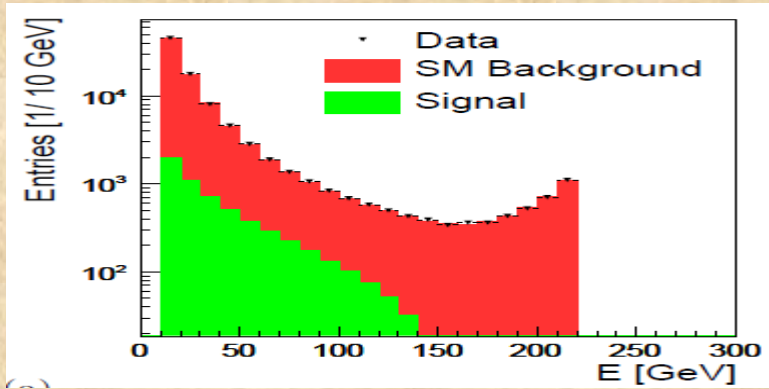
- **Invisible Higgs Branching fraction:**
 $Br(H \rightarrow \phi\phi) < 0.7\%$ (250 GeV & 250 fb⁻¹)
 [A. Yamamoto, A. Ishikawa, H. Yamamoto, ECFA2013]
- **ZBF process** ($ee \rightarrow eeZZ \rightarrow eeH^* \rightarrow ee\phi\phi$)
 $\sigma \sim 0.1 \times c^2 \text{ fb}$ (1TeV), $0.4 \times c^2 \text{ fb}$ (5TeV)
 [Kanemura, S.M., Nabeshima, Taniguchi, PLB701, 2011]



- e^+e^- collider は弱い相互作用をするDMの発見に有効(特に荷電SU(2)パートナー生成)。
 例) Higgsino DMの場合、 $e^+e^- \rightarrow \chi^+\chi^-\gamma$ 過程のシミュレーション等が挙げられる。
 [M. Berggeren, F. Brummer, J. List, et.al., arXiv:1307.3566]
- 500GeV, 500fb⁻¹, $P(e^+, e^-) = (30\%, -80\%) \rightarrow$**



- **Single (mono) photon 探査 @ e^+e^- collider**
- A Feynman diagram showing the production of a single photon γ at an e^+e^- collider. Two electrons (e) interact via a virtual electron (e) to produce a photon γ and a pair of dark matter particles χ and $\bar{\chi}$.
- $(\bar{\chi}\gamma^{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{E}\gamma_{\mu}E)/\Lambda^2$
 $\phi^2\text{LHE}/\Lambda^2, \text{ etc.}$
- LHCの場合とは異なった演算子を調べる事になる。
 例) 500GeV, 500fb⁻¹, $P(e^+, e^-) = (30\%, -80\%) \rightarrow$
 [C. Bartels, M. Berggeren, J. List, EPJ, C72, 2012]



まとめ

- LHCにおける暗黒物質探査、及び宇宙観測における暗黒物質の直接、間接探査が非常に発展したおかげで、**暗黒物質模型の詳細によらない解析手法(解析戦略)**を用いて、暗黒物質の性質に強い制限を与える事が可能となった。LHC(14TeV)における結果と共に更なる発展が期待される。
- LHC実験における暗黒物質探査と宇宙観測における暗黒物質探査は互いに**相補的な関係**にあり、両者を合わせて考える事がとても大事。
- 一般的に、LHC実験における暗黒物質探査は宇宙観測における暗黒物質探査に比べ様々な暗黒物質の相互作用を調べる事が可能であると言えるが、一方で幾つかの暗黒物質候補に関しては**どの程度まで探査可能かいまだ不明**なものもある。これらの候補(New minimal SM 模型のスカラー暗黒物質、(SUSY) Focus pointシナリオにおけるヒグシー/暗黒物質等)は標準模型を超える新物理模型構築の観点からも大事。
- 電子・陽電子衝突型コライダー(ILCやCLIC)は、暗黒物質探査と言う観点からは、LHCとは非常に異なった**相補的な実験**である。LHCで探査が難しい暗黒物質の性質はILC/CLICで探査しやすく、逆にILC/CLICで探査が難しい暗黒物質の性質はLHC(HL-LHC)で探査しやすかったりする。